

L'optique électronique : principes de base

Jacky RUSTE

EDF Recherches et Développement, Département Matériaux et Mécanique des Composants
 Les Renardières, BP1, 77181 Moret sur Loing Cedex
 ☎ 01 60 73 63 68 - 📠 01 60 73 65 59 – mël : jacky.ruste@edf.fr

Résumé : On rappelle les principes de base de la microscopie électronique : lois de l'optique, action des champs électrique et magnétique sur une particule chargée, principe des lentilles électroniques (électrostatique et électromagnétique), description des aberrations des lentilles...

Cet exposé sert d'introduction à l'exposé suivant relatif à la colonne électronique de P. Morin.

L'optique électronique, basée sur l'action d'un champ électrique ou magnétique sur une particule chargée, peut s'apparenter à l'optique classique photonique à quelques exceptions près. En particulier on peut construire l'équivalent de lentilles possédant les mêmes caractéristiques (foyers, distances focales, aberrations...) que les lentilles de verre.

1. ACTION D'UN CHAMP ÉLECTRIQUE

Une charge électrique q fixe génère un champ électrique \vec{E} défini par un potentiel scalaire $V(r)$ tel que :

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}V(r) \text{ avec } V(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q}{r}$$

Une particule de charge q' , soumise à ce champ électrique, subit une force $\vec{F} = q' \vec{E}$.

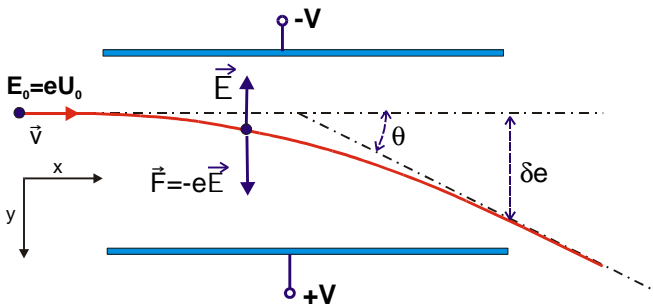


Figure 1 – Trajectoire d'un électron dans un champ électrique généré par 2 électrodes polarisées. La trajectoire est parabolique

$$y = \frac{E}{4U_0} x^2$$

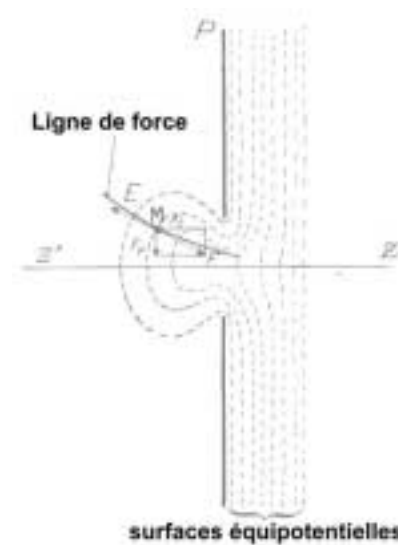


Figure 2 – Champ électrique au voisinage d'une électrode percée

Cette force ne dépend que de la charge de la particule incidente, elle est indépendante de sa masse. La direction de la force est celle du champ électrique, son sens étant défini par le signe de la charge de la particule.

La juxtaposition d'électrodes percées permet de constituer des lentilles électrostatiques convergentes ou divergentes et même des miroirs (figure 3).

Ces lentilles ne sont généralement plus utilisées en optique électronique mais, en raison de leur indépendance avec la masse de la particule, elles subsistent en optique ionique. En microscopie électronique à balayage on trouvera cependant des champs électriques au niveau du canon et du

détecteur d'électrons secondaires d'Evehart-Thornley. Signalons également la lentille finale des colonnes Zeiss-Gemini constituée d'une lentille mixte électrostatique-électromagnétique.

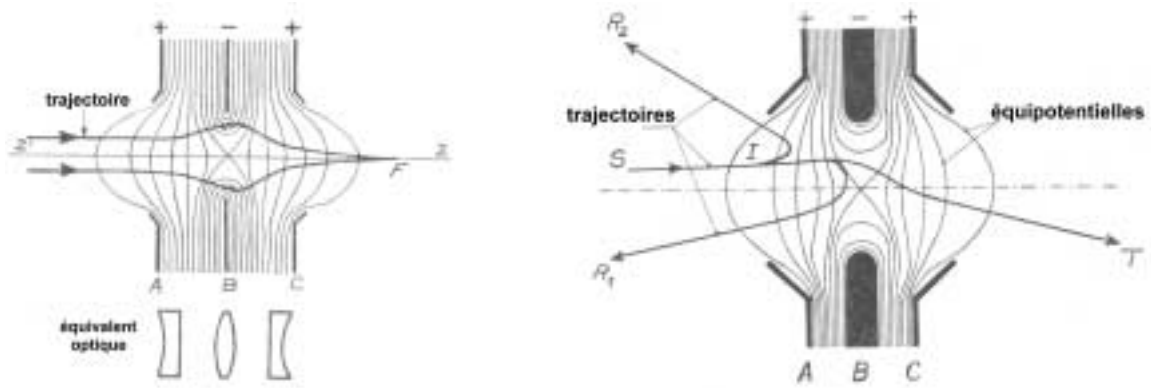


Figure 3 – Exemples de lentilles électrostatiques

2. ACTION D'UN CHAMP MAGNÉTIQUE

Une charge électrique en mouvement engendre un champ magnétique \vec{H} circulaire ou axial suivant la forme du conducteur électrique (figure 4).

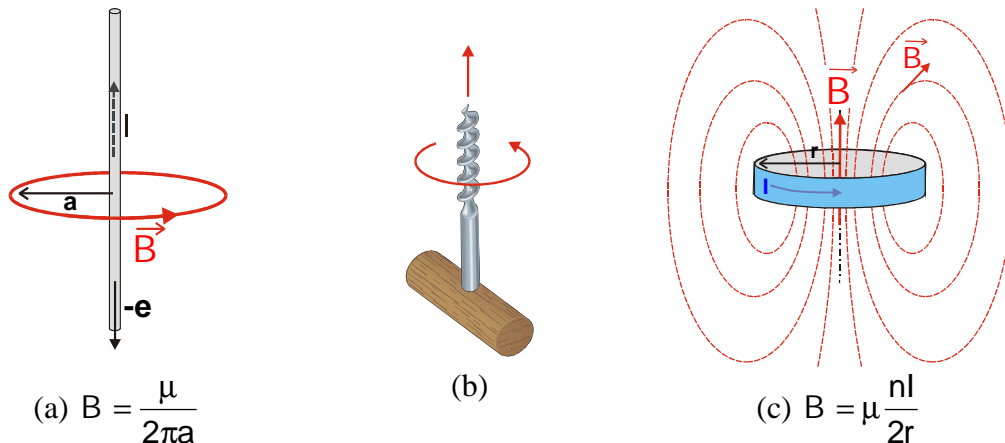
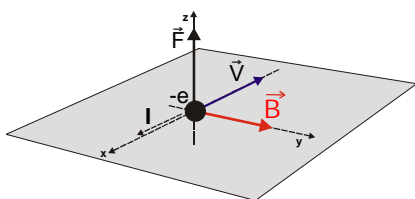


Figure 4 – Induction magnétique engendrée par un courant électrique linéaire (a) ou circulaire (c). Le sens respectif du courant électrique et du champ magnétique est donnée par la règle du tire-bouchon (b).

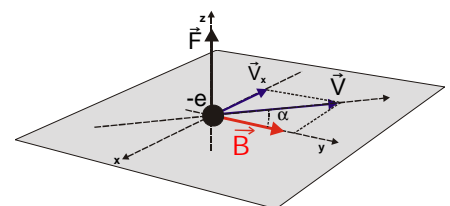
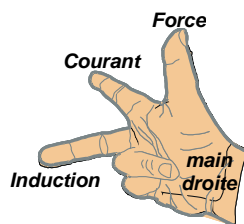
Dans un milieu donnée, ce champ magnétique crée une induction magnétique $\vec{B} = \mu \vec{H}$ où $\mu = \mu_0(1 + \chi)$ est la perméabilité magnétique du milieu, μ_0 la perméabilité du vide et χ la susceptibilité magnétique.

Cette induction magnétique peut agir sur une particule chargée, l'expression de la force exercée est donnée par la loi de Laplace :

$$\vec{F} = q\vec{v} \otimes \vec{B}$$

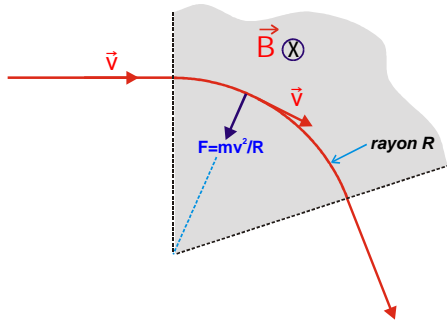


\vec{B} et \vec{v} perpendiculaire : $|\vec{F}| = qvB$



\vec{B} et \vec{v} obliques : $|\vec{F}| = qvB \sin \alpha$

Figure 5 – Loi de Laplace

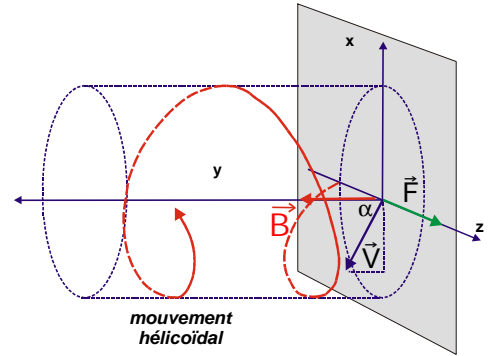


La direction de la force étant associée à la direction de la vitesse, la trajectoire d'une particule dans un champ magnétique est une portion de cercle de rayon R

$$R = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q}}$$

D'une façon plus générale, lorsque la direction de la particule fait un certain angle avec la direction du champ magnétique, la trajectoire résultante est hélicoïdale (figure 6).

Figure 6 – Trajectoire hélicoïdale d'une particule dans un champ magnétique.



3. LES LENTILLES ÉLECTRO MAGNÉTIQUES

3.1. Structure d'une lentille électromagnétique

Une lentille électromagnétique est constituée d'une bobine parcourue par un courant électrique et entourée par un blindage en alliage ferromagnétique possédant un faible cycle d'hystérésis.

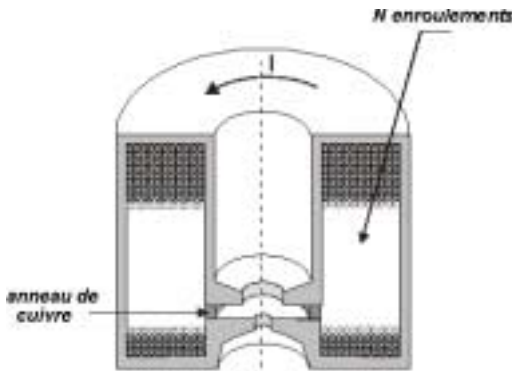


Figure 7 – Schéma d'une lentille électromagnétique

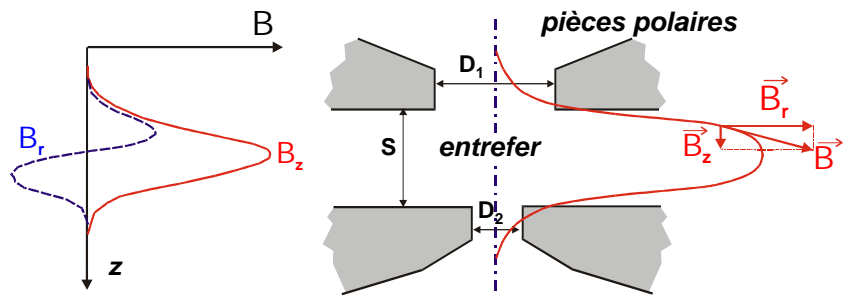


Figure 8 – Composantes axiale et longitudinale du champ magnétique dans l'entrefer

L'introduction d'un anneau diamagnétique et de pièces polaires permet de concentrer localement le champ magnétique près de l'axe de la lentille.

Les effets de ce champ sur une particule pénétrant dans l'entrefer sont complexes :

On observe à la fois une rotation de la trajectoire autour de l'axe et une convergence de la trajectoire vers l'axe (figure 9). La lentille électromagnétique est donc toujours convergente, contrairement aux lentilles électrostatiques qui peuvent être aussi bien convergentes que divergentes.

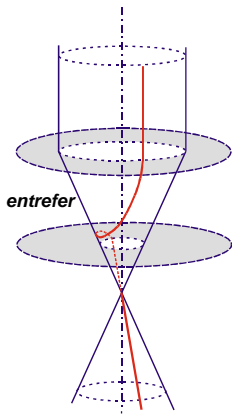


Figure 9 – Représentation schématique de la trajectoire d'une particule chargée dans le champ magnétique d'une lentille électromagnétique.

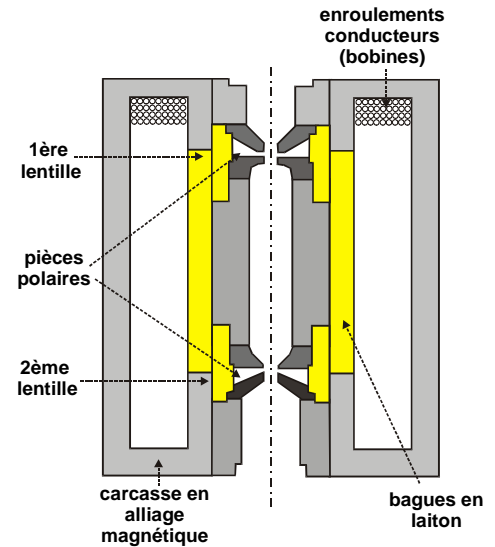


Figure 10 – Schéma d'un lentille électromagnétique double condenseur.

3.2. Aberrations des lentilles électromagnétiques

Les lentilles électromagnétiques possèdent les mêmes aberrations que les lentilles optiques, auxquelles s'ajoutent des aberrations spécifiques liées à la charge des particules. On peut distinguer les aberrations géométriques, chromatiques et de charge d'espace. L'aspect ondulatoire des électrons introduit également des effets de diffraction. Ces aberrations en augmentant le diamètre de la sonde électronique détériore la résolution du microscope.

L'aberration sphérique

Les électrons dont les trajectoires sont éloignées de l'axe sont plus déviés que ceux dont les trajectoires sont plus proche de l'axe. La focalisation du faisceau n'est plus ponctuelle mais correspond à un cercle de diamètre r_s (cercle de moindre confusion) qui augmente très fortement avec l'ouverture du faisceau :

$$2r_s = 0,5C_s\alpha^3$$

avec C_s constante d'aberration sphérique.

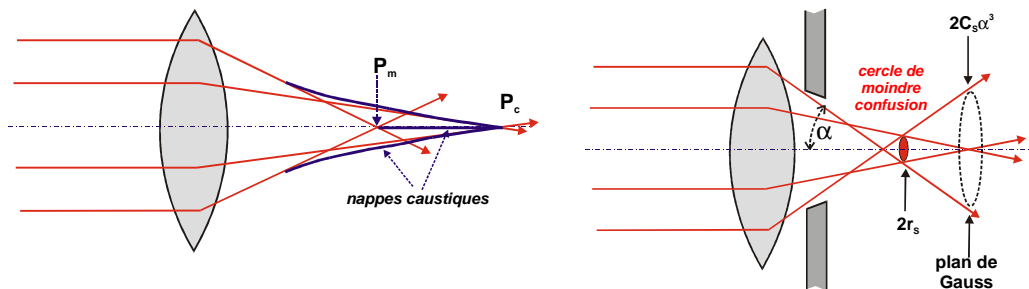


Figure 11 – L'aberration sphérique

En optique électronique, l'aberration sphérique est considérablement plus importante qu'en optique classique, d'où des ouvertures de faisceau extrêmement faibles, comprises entre 10^{-3} et 10^{-2} rd.

L'aberration chromatique

La dispersion énergétique ΔE de l'émission électronique au niveau du canon, quoique très faible, introduit une variation de la distance focale Δf , provoquant une nouvelle aberration, dite « chromatique ».

Remarque : Les valeurs des coefficients d'aberration sphérique et chromatique C_s et C_c diminuent fortement lorsque l'excitation de la lentille augmente. En diminuant la distance de

travail, ce qui nécessitera une augmentation de l'excitation de la lentille pour réduire la distance focale, on réduira l'influence de ces aberrations, ce qui améliorera la résolution.

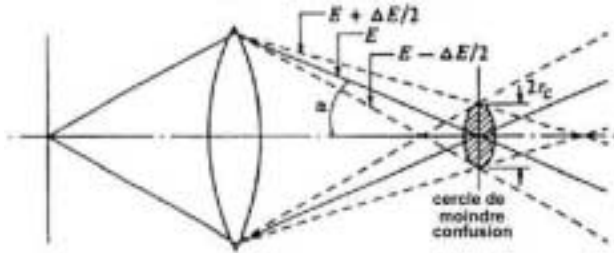


Figure 12 – L'aberration chromatique

$$\left. \begin{aligned} r_c &= 0,5\alpha\Delta f \\ \Delta f &= C_c \frac{\Delta E}{E} \end{aligned} \right\} \Rightarrow r_c = 0,5C_c \frac{\Delta E}{E} \alpha$$

L'aberration de diffraction

Lorsque l'ouverture du faisceau devient très faible, on ne peut plus négliger les effets de diffraction par le diaphragme final et la sonde présente une forme de tache de diffraction d'Airy.

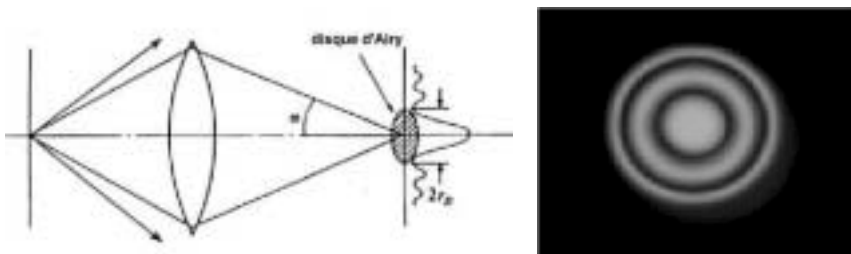


Figure 13
Aberration de diffraction et tache d'Airy

$$r_d = 0,61 \frac{\lambda}{\alpha} = 0,61 \frac{h}{\alpha \sqrt{2mE_0}}$$

L'aberration d'astigmatisme

	<p>L'astigmatisme correspond à une anisotropie de la focalisation selon 2 plans perpendiculaires. Il apparaît 2 singularités dans le faisceau électronique où ce dernier est réduit à 2 segments de droites, les « focales »(Fm et Fs) entre lesquelles on trouvera le cercle de moindre confusion D.</p> <p>L'astigmatisme peut être provoqué par un défaut au niveau des pièces polaires (contamination...) ou par l'échantillon (magnétisme...). Ce défaut peut être corrigé par un ensemble de bobines correctrices (octopole).</p> <p>Figure 14 – L'aberration d'astigmatisme</p>
--	---

Diamètre réel de la sonde électronique

Compte tenu des différentes aberrations, le diamètre réel de la sonde électronique d_0 peut être calculé par une somme quadratique des différentes contributions :

$$d_0^2 = d_G^2 + d_S^2 + d_d^2 + d_C^2$$

où d_G est le diamètre gaussien, lié à la brillance B du canon et à l'intensité I du faisceau électronique : $d_G = \frac{4I}{B\pi^2\alpha^2}$

En règle générale, seules les aberrations de la dernière lentille sont à prendre en compte.

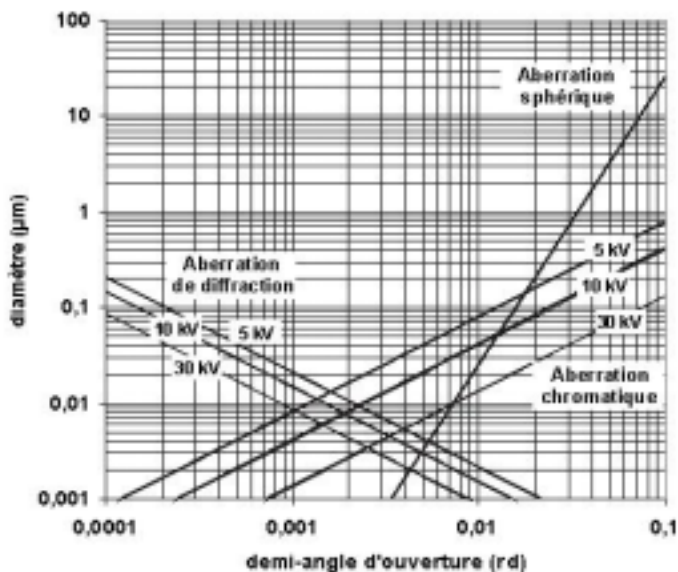


Figure 15 – Variation des différentes aberrations en fonction du demi-angle d'ouverture α

Calculs effectués pour les données suivantes :
 $C_S=5$ cm
 $C_C=2$ cm
 $\Delta E=2$ eV

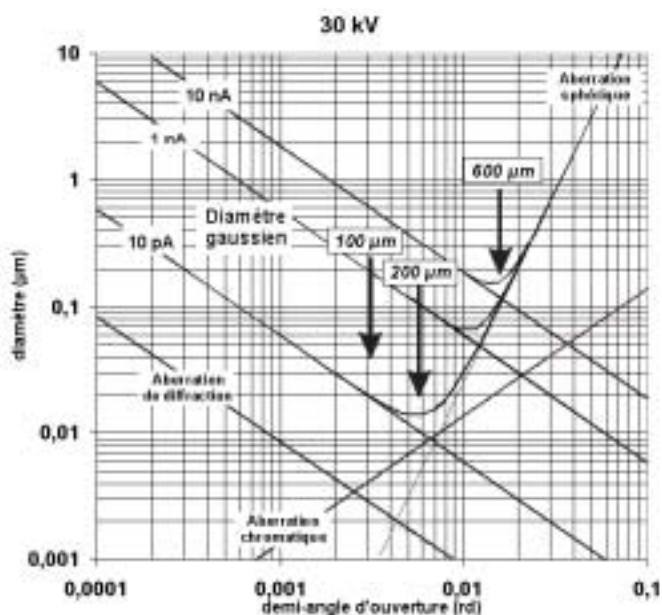


Figure 16 – Variation du diamètre réel de la sonde électronique en fonction du demi-angle d'ouverture α , à 30 kV et pour différentes valeurs de l'intensité électronique.

On indique les valeurs des demi-angle α pour les différents diaphragmes disponibles sur cet instrument (microanalyseur X)

4. Conclusion

L'association d'un canon à émission électronique et de plusieurs lentilles électromagnétique constitue une **colonne électronique**, à la base de nombreux instruments d'observation ou d'analyse, en particulier le microscope électronique à balayage et le microanalyseur à sonde électronique.